

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2002-048680

(43)Date of publication of application : 15.02.2002

(51)Int.Cl. G01M 11/02
G01J 4/04
G01N 21/21

(21)Application number : 2000-233772

(71)Applicant : ANRITSU CORP
KOSEKI TAKESHI

(22)Date of filing : 01.08.2000

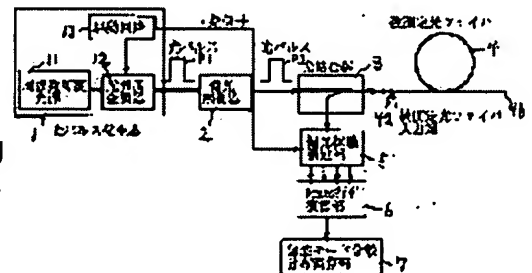
(72)Inventor : KOSEKI TAKESHI

(54) POLARIZATION MODE DISPERSION DISTRIBUTION MEASURING METHOD AND APPARATUS FOR OPTICAL FIBER

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a polarization mode dispersion distribution measuring method and apparatus which achieves measurement and computation of parameter values indicating polarization characteristics of a plurality of wavelength plates utilizing an optical time domain reflectometer practical used as a measuring apparatus of the propagation loss and back scattered characteristic distribution of optical fibers by accomplishing a modeling of an optical fiber to be measured in a serial connection of the plurality of wavelength plates.

SOLUTION: An optical pulse having a desired angular frequency and a pulse width emitted from an optical pulse generator 1 gets the polarization thereof with a polarization controller 2 to be incident from one end 4a of an optical fiber 4 to be measured through a photocoupler 33. Receiving back scattered light from the optical fiber 4 through the photocoupler 3, a polarization state measuring part 5 outputs a stokes parameter. A Johns set computing part 6 inputs the stokes parameter at a desired time interval to be stored as time series data of the stokes parameter and the time series of a Johns set is computed for three kinds of polarization states from the time series data of the stokes parameter. A polarization mode dispersion distribution computing part 7 computes a parameter indicating the polarization characteristic of the optical fiber 4 using the time series of the Johns set. Thus, a polarization mode dispersion distribution of the optical fiber 4 is computed from the parameter indicating the polarization characteristic for two kinds of desired angular frequencies.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-48680

(P2002-48680A)

(43) 公開日 平成14年2月15日 (2002.2.15)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード [*] (参考)
G 0 1 M 11/02		G 0 1 M 11/02	K 2 G 0 5 9
G 0 1 J 4/04		G 0 1 J 4/04	A
G 0 1 N 21/21		G 0 1 N 21/21	Z

審査請求 未請求 請求項の数 2 O L (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願2000-233772 (P2000-233772)

(22) 出願日 平成12年8月1日 (2000.8.1)

(71) 出願人 000000572

アンリツ株式会社

東京都港区南麻布5丁目10番27号

(71) 出願人 596043704

小関 健

埼玉県川口市栄町3-11-17-903

(72) 発明者 小関 健

埼玉県川口市栄町3-11-17-903

Fターム(参考) 2G059 AA02 BB15 EE05 FF04 GG04

GG08 GG09 JJ19 JJ20 JJ22

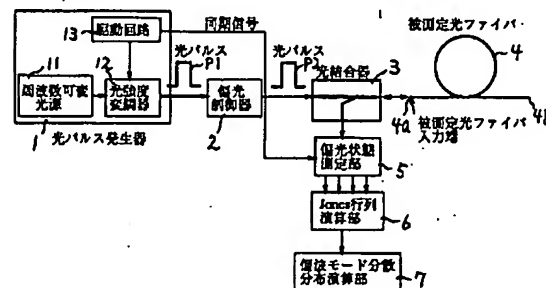
KK04 MM01

(54) 【発明の名称】 光ファイバの偏波モード分散分布測定方法及び装置

(57) 【要約】

【課題】光ファイバの偏波モード分散分布測定装置を提供する。

【解決手段】光パルス発生器1から出射された所望の角周波数、パルス幅を有する光パルスは偏光状態を偏光制御器2で制御され、光結合器3を介して被測定光ファイバ4の一端4aから入射される。光ファイバ4からの後方散乱光を光結合器3を介して受けた偏光状態測定部5はストークスパラメータを出力する。ジョーンズ行列演算部6はストークスパラメータを所望の時間間隔で取り込んでストークスパラメータの時系列データとして蓄え、3種類の偏光状態についてのストークスパラメータの時系列データからジョーンズ行列の時系列を演算する。偏波モード分散分布演算部7はジョーンズ行列の時系列を用いて光ファイバ4の偏光特性を表すパラメータを演算し、2種類の所望の角周波数についての偏光特性を表すパラメータから光ファイバ4の偏波モード分散分布を演算する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 被測定光ファイバの入射端に異なる偏光状態を有する光パルスを各々入射し、該入射端と同一の端面側に設けたストークスアナライザを用いて、各々の入射光パルスに対応する前記被測定光ファイバからの後方散乱光の偏光状態をストークスパラメータの時系列データとして測定し、該測定された異なる入射偏光状態に対応するストークスパラメータの時系列データを用いて、前記被測定光ファイバの偏光特性を記述するジョーンズ行列の時系列を演算し、該演算されたジョーンズ行列の時系列を用いて、前記被測定光ファイバの偏光特性を表すパラメータの前記被測定光ファイバに沿った分布を演算する一連の手続き(Step 1, Step 2, Step 3, Step 4)を、前記被測定光ファイバの入射端にキャリア周波数の互いに異なる2つの光パルスを入射して行い(Step 5, Step 6)、各々のキャリア周波数を有する入射光パルスに対応して演算された前記被測定光ファイバの偏光特性の分布を表すパラメータを用いて差分演算を行うことにより、前記被測定光ファイバを透過する光に対応する偏波モード分散の前記被測定光ファイバに沿った分布を測定する(Step 7)ことを特徴とする光ファイバの偏波モード分散分布測定方法。

【請求項2】 キャリア周波数の互いに異なる光パルスの出射が可能であって、第1の光パルスを出射する光パルス発生器(1)と、出射光の偏光状態を複数の偏光状態に制御可能であって、前記第1の光パルスを受けてその偏光状態が制御された第2の光パルスを出射する偏光制御器(2)と、該第2の光パルスを第1のポートで受けて第2のポートを通して被測定光ファイバ(4)に導くとともに、該被測定光ファイバからの後方散乱光を前記第2のポートで受けて第3のポートから出射する光結合器(3)と、前記第3のポートから出射された後方散乱光を受けて、所定時間間隔毎に当該所定時間に受けた後方散乱光の偏光状態を表すストークスパラメータを出力する偏光状態測定部(5)と、該偏光状態測定部からの前記ストークスパラメータを受けて、その時系列データを記憶するとともに、前記第2の光パルスの複数の偏光状態にそれぞれ対応する複数の時系列データを用いて、ジョーンズ行列の時系列データを演算するジョーンズ行列演算部(6)と、該ジョーンズ行列演算部からの前記ジョーンズ行列の時系列データを受けて、被測定光ファイバの偏光特性を表すパラメータの時系列データを演算し記憶するとともに、前記第1の光パルスの互いに異なるキャリア周波数にそれぞれ対応する2組の前記偏光特性を表すパラメータの時系列データを用いて、前記所定時間間隔の各所定時間に対応する2つの偏光特性を表すパラメータの周波数差分演算を行うことで、前記被測定光ファイバにおける偏波モード分散分布を演算する偏波モード分散分布演

算部(7)とを備えた光ファイバの偏波モード分散分布測定装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、通信線路に光ファイバを利用した通信(以下、「光ファイバ通信」と言う。)の分野において、通信特性、特に通信速度の上限を決定する一要因である偏波モード分散(PMD:Polarization Mode Dispersion)の、光ファイバに沿った分布を測定する光ファイバの偏波モード分散分布測定方法及び装置に関する。

【0002】

【従来の技術】近年のインターネット利用者の増加を一因とする通信量の急増に伴い、光ファイバ通信速度の高速化が求められている。高速の光ファイバ通信を行う場合、従来の通信速度では問題にならなかった光ファイバの有する偏波モード分散が、通信速度の上限を決定する一因として注目され、その測定法の研究や測定装置の開発が盛んに行われている。特に、既に敷設された光ファイバを利用して高速通信を行うために、光ファイバに沿った偏波モード分散分布の測定装置への要求が高まっている。なぜなら、偏波モード分散分布を測定した結果、その周辺部分と比較して高い偏波モード分散を有すると診断された箇所の光ファイバを、近年の製造技術の進歩により製造可能となった偏波モード分散を低く抑えた光ファイバと交換することで、光ファイバ全体を新たに敷設する場合と比較して低コストで高速通信が可能となるからである。

【0003】偏波モード分散は、光ファイバ内で光が閉じ込められるコアの楕円化(真円からのずれ)や、コアを囲むクラッドに対するコアの偏心により発生することが以下に挙げる文献1、文献2において示されており、近年の製造技術の進歩により、偏波モード分散を低く抑えた光ファイバも製造可能となってきている。また、逆に光ファイバ通信の初期段階で敷設され、現在も使用されている光ファイバについては、当時の製造技術から考えて、光ファイバに沿った偏波モード分散は均一ではなく大小の分布を持つことが予測される。

文献1 岡本勝就「光ファイバの伝搬特性」O plus E, vol.21, no.5, pp.570-576, 1999

文献2 岡本勝就「光ファイバの分散の諸要因」O plus E, vol.21, no.6, pp.706-714, 1999

【0004】偏波モード分散測定に係わる従来技術については、以下に示す文献3にまとめられており、大別して時間領域法と周波数領域法に分類される。

文献3 波平宜敬「光ファイバ及び光部品の種類偏波モード分散(PMD)測定法の比較」, 信学技法, OCS99-42, pp.7-12, 1999

【0005】時間領域法は、発光スペクトルの広い光源を利用した干渉計測法である。光源の発光スペクトル幅

を Δf として、該光源からの出力光と光路長差可変のマイケルソン型干渉系を利用して遅延時間差を付与した直交2偏波光を用意する。該直交2偏波光を被測定光ファイバの一端面より入射し、該被測定光ファイバを伝搬、通過し、該被測定光ファイバの他の端面より出射された光を、方位角45度に設定した偏光子を通過させ、通過光量を光検出器で測定する。方位角を45度に設定したことで、前記直交2偏波間の干渉光強度が測定される。前記直交2偏波間には、前記被測定光ファイバより出射された時点において、前記マイケルソン型干渉系により付与された遅延時間差 τ と、前記被測定光ファイバの有する偏波モード分散、すなわち直交2偏波間の遅延時間差 τ_p の和 $\tau + \tau_p$ が付与されている。

【0006】発光スペクトル幅 Δf を有する光源からの出力光は、 $1/\Delta f$ 以上の遅延時間差を付与されると可干渉性を失う、すなわち、遅延時間差を変化させても干渉光強度が変化しなくなるという性質を持つ。なぜなら周波数 f の単色光による干渉光強度は、遅延時間差 τ を変化させると $\tau = 0$ で最大値を取り周期 $1/f$ で振動することから、発光スペクトル幅 Δf の光を用いた場合には周期の異なる振動が重畳される結果、干渉光強度は $\tau = 0$ の近傍を除き一様になるからである。

【0007】したがって、前記マイケルソン型干渉系によって付与される遅延時間差 τ を変化させると、 $|\tau + \tau_p| < 1/\Delta f$ ($||$ は絶対値を表し、 $|\tau + \tau_p|$ は $(\tau + \tau_p)$ の絶対値)の条件が満たされる場合に限り、 τ の変化に応じて、前記偏光子の通過光量に振動が現れる。前記偏光子通過光量の振動振幅が最大となる $|\tau|$ が被測定光ファイバの偏波モード分散を与える。以上説明したように、時間領域法においては被測定光ファイバの偏波モード分散を、測定に用いる光源の発光スペクトル幅の逆数 $1/\Delta f$ の精度で測定可能である。

【0008】周波数領域法は、周波数可変光源と偏光解析器を利用した偏波モード分散測定法である。図4に周波数領域法による偏波モード分散測定装置の構成図を示す。周波数可変光源11からの出力光を被測定光ファイバ4の一端面4aより入射し、該被測定光ファイバ4を伝搬、通過し、該被測定光ファイバ4の他の端面4bより出射された光の偏光状態の周波数特性、すなわち被測定光ファイバ4への入射光周波数を変化させた場合の出射偏光状態の変化を、偏光解析器8を用いて解析する。

【0009】周波数領域法には、偏光解析の手法により、固定アナライザ法、ポアンカレ球法、ジョーンズ行列法がある。固定アナライザ法では、被測定光ファイバ4からの出射光を方位角固定の偏光子(検光子)81を通過させた後の光量を光検出器82で測定し、該光量の周波数特性より偏波モード分散を算出する。なお、周波

数可変光源11と光検出器を組合せ、周波数可変光源11の周波数を掃引して偏光子通過光量の周波数特性を得るかわりに、周波数可変光源11を発光スペクトルの広い光源、光検出器82を光スペクトラムアナライザにそれぞれ置き換えて、偏光子通過光量の周波数特性をまとめて測定した結果より偏波モード分散を算出する方法もまた固定アナライザ法と呼ばれる。

【0010】ポアンカレ球法、ジョーンズ行列法では、被測定光ファイバ4からの出射光を、光分岐器、偏光子、4分の1波長板から構成されるストークスアナライザ83を通過させ、該ストークスアナライザ83からの複数の出力光量を光検出器84で測定する。該測定された複数の光量は、前記出射光の偏光状態を表すストークスパラメータと呼ばれる。ポアンカレ球法では、ストークスパラメータがポアンカレ球上で描く軌跡の周波数特性より偏波モード分散を算出する。ジョーンズ行列法では、被測定光ファイバ4への入射光偏光状態を切り替えて測定されたストークスパラメータを用いてジョーンズ行列演算部9において算出されるジョーンズ行列要素の周波数特性より偏波モード分散を算出する。入射光偏光状態の切り替えは、前記周波数可変光源11と被測定光ファイバ4の入射側端面4aとの間に挿入された偏光制御器2により実施される。

【0011】本願発明の偏波モード分散分布測定法はジョーンズ行列法との関連が深いので、以下にジョーンズ行列法における偏波モード分散算出過程を説明する。光の偏光状態の変換を行う光部品の入出力特性を表現し解析するのに用いられるのがジョーンズ行列である。光部品への入射光、光部品からの出射光の偏光状態を2次元のジョーンズベクトル、ベクトル u 、ベクトル v (数1以下の数式中ではベクトル量を太字で表す。 u 、 v 以外の文字についても同じ)でそれぞれ表すとき、2行2列の行列 U が該光部品のジョーンズ行列であるとは次の関係式が成り立つことである。

【0012】

【数1】

$$\mathbf{v} = U\mathbf{u} \quad (1)$$

【0013】偏波モード分散の測定対象である光ファイバの場合、伝搬損失の偏光状態依存性(偏波依存損失)を無視できるので、対応するジョーンズ行列 U は行列式1のユニタリー行列となり次の関係式を満足する。ここで*は複素共役、†はエルミート共役をそれぞれ表す。また光の角周波数を ω とし、 U の行列要素が ω の関数であることを明示した。

【0014】

【数2】

$$U = \begin{pmatrix} u(\omega) & v(\omega) \\ -v^*(\omega) & u^*(\omega) \end{pmatrix}, \quad UU^\dagger = U^\dagger U = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

特に $|u|^2 + |v|^2 = 1$ (2)

【0015】被測定光ファイバの偏光変換特性を表すジョーンズ行列 U は、行列要素 $u(\omega)$ 、 $v(\omega)$ それぞれの実部、虚部の内の3つが決まれば、他の1つは関係式(2)より決定される。したがって、3種類の異なる偏光状態を有する入射光を用いた場合の出射偏光状態をそれぞれ測定することにより、関係式(1)を満足する U が*

*決定される。 U を決定する際には、実測されるストークスパラメータ S_0, S_1, S_2, S_3 を用いて(右上添字の t は転置を表す。)、

$$\mathbf{s} = (s_1, s_2, s_3)^t = (S_1/S_0, S_2/S_0, S_3/S_0)^t \quad (3)$$

【0017】で定義される規格化ストークスベクトル、ベクトル \mathbf{s} と、やはり出射偏光状態を表すジョーンズベクトル、ベクトル \mathbf{v} とが、 γ を実数として

※【0018】
【数4】

$$\mathbf{v} = \frac{\exp(i\gamma)}{\sqrt{2(1+s_1)}} \begin{pmatrix} 1+s_1 \\ s_2+is_3 \end{pmatrix},$$

$$\lim_{s_1 \rightarrow -1} \mathbf{v} = \exp(i\gamma) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

【0019】なる関係で結ばれることを利用する。関係式(4)はジョーンズベクトル、ベクトル $\mathbf{v} = (a, b)^t$ によるストークスパラメータの表現式(5)より $(s_2 + is_3)/(1+s_1) = b/a$ が成り立つことから★30

★の帰結である。
【0020】
【数5】

$$S_0 = |a|^2 + |b|^2, \quad S_1 = |a|^2 - |b|^2, \\ S_2 = ab^* + a^*b, \quad S_3 = i(ab^* - a^*b) \quad (5)$$

【0021】条件式(2)よりジョーンズ行列 U を、実数値を取るパラメータ Θ, ϕ, ψ を用いて以下のように表示する。

☆【0022】
【数6】

$$U = \begin{pmatrix} \cos \Theta \exp\left(\frac{i(\phi+\psi)}{2}\right) & \sin \Theta \exp\left(\frac{i(\phi-\psi)}{2}\right) \\ -\sin \Theta \exp\left(\frac{-i(\phi-\psi)}{2}\right) & \cos \Theta \exp\left(\frac{-i(\phi+\psi)}{2}\right) \end{pmatrix} \quad (6)$$

【0023】被測定光ファイバへの入射偏光状態を、 A : 水平偏光、 B : 垂直偏光、 C : 45度直線偏光と選ぶ。各入射偏光状態に対応するジョーンズベクトルは ◆

◆【0024】
【数7】

$$\mathbf{u}_A = (1, 0)^t, \quad \mathbf{u}_B = (0, 1)^t, \quad \mathbf{u}_C = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1)^t \quad (7)$$

【0025】と表される。各入射偏光状態に対し実測される
ストークスパラメータに基づく規格化ストークスペクトルを

$$s_A = (s_1^A, s_2^A, s_3^A)^t, s_B = (s_1^B, s_2^B, s_3^B)^t, s_C = (s_1^C, s_2^C, s_3^C)^t \quad (8)$$

【0027】と置くと、式(1)、(4)、(6)より入射偏光状態A、Bに対して次式を得る。

$$\frac{\exp(i\gamma_A)}{\sqrt{2(1+s_1^A)}} \begin{pmatrix} 1+s_1^A \\ s_2^A + is_3^A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Theta \exp\left(\frac{i(\phi+\psi)}{2}\right) \\ -\sin \Theta \exp\left(\frac{-i(\phi-\psi)}{2}\right) \end{pmatrix} \quad (9)$$

【0029】

$$\frac{\exp(i\gamma_B)}{\sqrt{2(1+s_1^B)}} \begin{pmatrix} 1+s_1^B \\ s_2^B + is_3^B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \Theta \exp\left(\frac{i(\phi-\psi)}{2}\right) \\ \cos \Theta \exp\left(\frac{-i(\phi+\psi)}{2}\right) \end{pmatrix} \quad (10)$$

【0030】式(9)、(10)より
【0031】

$$\begin{aligned} \cos \Theta &= \sqrt{\frac{1+s_1^A}{2}}, \gamma_A = \frac{\phi+\psi}{2}, \\ \sin \Theta &= \sqrt{\frac{1+s_1^B}{2}}, \gamma_B = \frac{\phi-\psi}{2} \end{aligned} \quad (11)$$

【0032】が成り立ち、したがって
【0033】

$$\Theta = \tan^{-1} \sqrt{\frac{1+s_1^B}{1+s_1^A}}, \quad (12)$$

【0034】

$$\exp(-i\phi) = -\frac{s_2^A + is_3^A}{\sqrt{(1+s_1^A)(1+s_1^B)}} = \frac{s_2^B + is_3^B}{\sqrt{(1+s_1^A)(1+s_1^B)}} \quad (13)$$

【0035】を得る。次に、 $t = \tan \Theta$ 、 $x^2 = \exp(-i\phi)$ 、 $y^2 = \exp(-i\psi)$ と置くと、入射偏光状態Cに対して、

$$\begin{aligned} \frac{s_2^C + is_3^C}{1+s_1^C} &= \frac{-txy^{-1} + xy}{x^{-1}y^{-1} + tx^{-1}y} = \frac{-tx^2 + x^2y^2}{1+ty^2}, \text{より} \\ \exp(-i\psi) &= y^2 = \frac{\xi + tx^2}{x^2 - t\xi}, \text{ただし } \xi = \frac{s_2^C + is_3^C}{1+s_1^C} \end{aligned} \quad (14)$$

【0037】式(12)、(13)、(14)よりジョーンズ行列を★50★表すパラメータ Θ 、 ϕ 、 ψ が、3種類の入射偏光状態に

対し実測されるストークスベクトルを用いて求められた。

【0038】ジョーンズ行列法による偏波モード分散測定法は文献4で提案された主偏光状態(Principal state of polarisation)の概念に基づいている。

文献4 C.D.Poole and R.E.Wagner, "Phenomenological approach to polarisation dispersion in long single-mode fibers," Electronics Letters, vol.11, no.19, pp.1029-1030, 1986

文献4によると主偏光状態とは、「被測定光ファイバへ*

*の入射光の偏光状態であって、入射光周波数を変化させても、光ファイバを伝搬し出射された光の偏光状態が変化しない状態」と定義される。以下、主偏光状態にて被測定光ファイバに入射された場合の出射偏光状態もまた主偏光状態と呼ぶことにする。

【0039】今、出射偏光状態の周波数依存性を考察するために、式(1)の両辺を角周波数で微分し次式を得る。

【0040】

【数15】

$$\frac{dv}{d\omega} = \left(\frac{dU}{d\omega} u + U \frac{du}{d\omega} \right) = \frac{dU}{d\omega} U^{-1} v = \frac{dU}{d\omega} U^{\dagger} v = Dv,$$

$$\text{ただし } D = \frac{dU}{d\omega} U^{\dagger} \quad (15)$$

【0041】ここで入射偏光状態は周波数無依存としd(ベクトルu)/dω=0と置いた。着目する角周波数をω₀とし、ω-ω₀を改めてωと置いて角周波数ω=0の近傍で考察する。出射偏光状態ベクトルv=ベクトル

v(ω)のテーラー展開をωの一次の項までとり、関係式(15)を用いると次式を得る。

【0042】

【数16】

$$v(\omega) = v(0) + \left. \frac{dv}{d\omega} \right|_{\omega=0} \omega = v(0) + D(0)v(0)\omega \quad (16)$$

【0043】λを任意の複素数としてベクトルvとλベクトルvとが同一の偏光状態を表すことより、ベクトルv(ω)が主偏光状態であるためにはベクトルv(0)がD=D(0)の固有ベクトルであればよいことがわか★

★る。すなわち

【0044】

【数17】

$$Dv(0) = \lambda v(0) \text{ ならば } v(\omega) = (1 + \lambda\omega)v(0) \quad (17)$$

【0045】より、出射偏光状態は周波数無依存、したがって主偏光状態となる。

30 ☆-ト行列という性質を用いる。先ず、ジョーンズ行列Uのユニタリー性を表す関係式UU[†]=I(単位行列)を周波数微分して得られる関係を利用して

【0047】

【数18】

$$(iD)^{\dagger} = -iU \frac{dU^{\dagger}}{d\omega} = i \frac{dU}{d\omega} U^{\dagger} = iD \quad (18)$$

【0048】より行列iDはエルミート行列である。次に行列iDの対角和Tr(iD)は、以下の計算と関係式(2)より0となる。ただし角周波数ωによる微分を

◆でも表した。

40 【0049】

◆ 【数19】

$$\begin{aligned} \text{Tr}(iD) &= i \text{Tr} \left(\frac{dU}{d\omega} U^{\dagger} \right) = i \text{Tr} \left(\begin{pmatrix} u' & v' \\ -(v^*)' & (u^*)' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u^* & -v \\ v^* & u \end{pmatrix} \right) \\ &= i(u'u^* + v'v^* + u(u^*)' + v(v^*)') \\ &= i \frac{d}{d\omega} (|u|^2 + |v|^2) = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

【0050】以上示したiDの性質から、iDの固有値はτを実数として±τと置くことができる。一般に2行*50

*2列の行列Xの固有値の積はXの行列式det(X)に等しいという性質を使うと

【0051】

$$\begin{aligned}
 (+\tau)(-\tau) &= -\tau^2 = \det \left(i \frac{dU}{d\omega} U^\dagger \right) = \det \left(i \frac{dU}{d\omega} \right) \det (U^\dagger) \\
 &= \det \left(i \frac{dU}{d\omega} \right) = -(|u'|^2 + |v'|^2) \quad (20)
 \end{aligned}$$

【0052】したがってDの固有値を $\pm i\tau$ として ※【数21】

【0053】

$$\pm i\tau = \pm i \sqrt{|u'|^2 + |v'|^2} \quad (21)$$

【0054】が得られた。固有値 $\pm i\tau$ に対応する固有ベクトルをベクトル x 右下添字 \pm (複合同順)とすると、エルミート行列の異なる固有値に対応する固有ベクトルは互いに直交するという性質から、ベクトル x 右下添字 $+$ 、ベクトル x 右下添字 $-$ は互いに直交する。そこで $\pm i\tau$ 、ベクトル x 右下添字 \pm を式(17)に代入して、★

$$v_{\pm}(\omega) = (1 \pm i\tau\omega)x_{\pm} = \exp(\pm i\tau\omega)x_{\pm} \quad (22)$$

【0056】が得られる。被測定光ファイバの偏波モード分散 τ_p は、互いに直交する主偏光状態間の遅延時間(位相の角周波数による微分値)の差として与えられる☆

$$\tau_p = 2\tau = 2\sqrt{|u'|^2 + |v'|^2} \quad (23)$$

【0058】として偏波モード分散 τ_p が算出される。

【0059】以上説明した算出過程より、ジョーンズ行列法における偏波モード分散測定は次の手順にて実施される。

〔第1段〕 角周波数 ω の光を用いて、被測定光ファイバの偏光特性を表すジョーンズ行列 $U(\omega)$ を求める。具体的には、3種類の入射偏光状態に対する出射ストークスベクトルをストークスアナライザを用いて測定した結果より $U(\omega)$ を算出する。

〔第2段〕 角周波数 $\omega + \Delta\omega$ の光を用いて〔第1段〕と同様の測定、演算を行い、 $U(\omega + \Delta\omega)$ を求める。

〔第3段〕 前段までの測定、演算結果を用いて、 $u' \equiv (u(\omega + \Delta\omega) - u(\omega)) / \Delta\omega$ 、 $v' \equiv (v(\omega + \Delta\omega) - v(\omega)) / \Delta\omega$ を算出し、式(23)より偏波モード分散 τ_p を算出する。

◆ $(\omega + \Delta\omega) - v(\omega) / \Delta\omega$ により u' 、 v' を算出し、式(23)より偏波モード分散 τ_p を算出する。

【0060】従来の技術の最後に、以上説明してきたジョーンズ行列法と、ジョーンズ行列法と同様に被測定光ファイバの出射側端面においてストークスベクトルを測定し、入射光周波数を変化させたときストークスベクトルがポアンカレ球面上で描く軌跡より偏波モード分散を算出するポアンカレ球法との関連を説明する。まず、ジョーンズベクトル、ベクトル $v = (a, b)^t$ と、ストークスパラメータ S_i 、 $i = 0, 1, 2, 3$ との間の次の関係式から出発する。式(5)を利用すると

【0061】

【数24】

$$\begin{aligned}
 vv^\dagger &= \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} (a^* \ b^*) = \begin{pmatrix} |a|^2 & ab^* \\ a^*b & |b|^2 \end{pmatrix} \\
 &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} S_0 + S_1 & S_2 - iS_3 \\ S_2 + iS_3 & S_0 - S_1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} (S_0 I + \sigma \cdot \mathbf{S}) \quad (24)
 \end{aligned}$$

【0062】を得る。 I は単位行列、ベクトル $\mathbf{S} = (S_1, S_2, S_3)$ であり、ベクトル σ は次式で定義され、ベクトル $\sigma \cdot$ ベクトル $\mathbf{S} = \sigma_1 S_1 + \sigma_2 S_2 + \sigma_3 S_3$ である。

【0063】

【数25】

$$\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = \left(\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \right) \quad (25)$$

【0064】式(24)の最左辺ベクトル v ・ベクトル v 右上添字 \dagger を角周波数 ω で微分し、式(15)、(24)を利用すると

$$\begin{aligned} \frac{d(vv^\dagger)}{d\omega} &= \frac{dv}{d\omega}v^\dagger + v\frac{dv^\dagger}{d\omega} = Dvv^\dagger - vv^\dagger D \\ &= [D, vv^\dagger] = \frac{1}{2}[D, \sigma \cdot S] \end{aligned} \quad (26)$$

【0066】を得る。 $[A, B]$ は行列 A, B の交換子 $AB - BA$ を表す。一方、式(24)の最右辺からは、光量を表す S_0 は周波数無依存と仮定して次式を得る。

$$\frac{1}{2} \frac{d}{d\omega} (S_0 I + \sigma \cdot S) = \frac{1}{2} \left(\sigma \cdot \frac{dS}{d\omega} \right) \quad (27)$$

【0068】以上より次の関係式が得られた。
【0069】

$$\sigma \cdot \frac{dS}{d\omega} = [D, \sigma \cdot S] \quad (28)$$

【0070】ジョーンズ行列法の説明で述べたように D は対角和0のエルミート行列であったから、 a, b, c を実数として

$$D = \begin{pmatrix} ia & c+ib \\ -c+ib & -ia \end{pmatrix} = i(\sigma_1 a + \sigma_2 b + \sigma_3 c) = i\sigma \cdot D, \quad \text{ただし } D = (a, b, c) \quad (29)$$

【0072】と表される。すると式(28)の右辺は、公式(ベクトル σ ・ベクトル A) (ベクトル σ ・ベクトル B) = ベクトル A ・ベクトル $B + i$ ベクトル σ ・(ベクトル $A \times$ ベクトル B)を用いて

$$\begin{aligned} [D, \sigma \cdot S] &= i[\sigma \cdot D, \sigma \cdot S] \\ &= i\{D \cdot S + i\sigma \cdot (D \times S) - S \cdot D - i\sigma \cdot (S \times D)\} \\ &= 2\sigma \cdot (S \times D) \end{aligned} \quad (30)$$

【0074】と表されるので、式(28)、(30)より
【0075】

$$\frac{dS}{d\omega} = S \times \Omega, \quad \text{ただし } \Omega = 2D = (2a, 2b, 2c) \quad (31)$$

【0076】を得る。ベクトル $\Omega = (0, 0, |\text{ベクトル}\Omega|)$ と成分表示される座標系で、式(31)を成分毎に書き下すと、被測定光ファイバへの入射光周波数を変化させたとき、光ファイバ射出端面で測定されるストークスベクトルは、ポアンカレ球面上でベクトル Ω を回転軸とする周期 $2\pi/|\text{ベクトル}\Omega|$ の歳差運動を行うこと

※がわかる。さらに式(31)は、ベクトル Ω に平行、または反平行なストークスベクトルに対応する出射偏光状態は、入射光周波数を変化させても変化しないことを含意し、これら2つの偏光状態が、文献4で導入された互いに直交する2つの主偏光状態に相当している。

【0077】ポアンカレ球法は、被測定光ファイバへの

入射光周波数を変化させたとき、光ファイバ射出端面で測定されるストークスベクトルの行う歳差運動の周期の逆数ベクトル Ω を被測定光ファイバの有する偏波モード分散とする測定法であり、この偏波モード分散値ベクトル Ω が、ジョーンズ行列法で得られる互いに直*

* 交する主偏光状態間の遅延時間差としての偏波モード分散と一致することは次の計算により示される。

【0078】

【数32】

(Poincaré球法による偏波モード分散) = $|\Omega|$

$$= 2\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$$

$$= 2\sqrt{\det(D)} = 2\sqrt{\det\left(\frac{dU}{d\omega}U^\dagger\right)} = 2\sqrt{|u'|^2 + |v'|^2}$$

= (Jones行列法による偏波モード分散)

(32)

【0079】原理的には同一の偏波モード分散を与えることが示されたポアンカレ球法とジョーンズ行列法の実用面での優劣を比較すると、ポアンカレ球法では被測定光ファイバへの入射偏光状態の切替えは不要であり、ジョーンズ行列法よりも装置構成は簡略化される。一方、測定されたストークスパラメータより偏波モード分散を演算する手続きについては、ポアンカレ球法で演算されるストークスベクトルの行う歳差運動の周期については、ストークスベクトルの軌跡に不連続性等が現れる場合への対処法が不明確であるのに対し、ジョーンズ行列法はジョーンズ行列要素の周波数差分演算として明確化されている。

【0080】

【発明が解決しようとする課題】以上説明してきた従来の偏波モード分散測定法に関連して、2つの解決すべき課題を指摘できる。第1の課題は、被測定光ファイバの片側の端面に光源、光検出器を配置し、被測定光ファイバを往復した光を検出する装置構成(配置)をとりながらも(以下、本装置構成(配置)を反射型装置と言う。)、被測定光ファイバを透過した光に対する偏波モード分散を測定可能とすることである。従来の偏波モード

※分散測定法では、被測定光ファイバの片側の端面に光源、他の端面に光検出器を配置するので(従来の装置構成を透過型装置と言う。)、光ファイバ通信速度の上限に直接関与する被測定光ファイバ透過光に対する偏波モード分散を測定可能である。しかし、実際に敷設された光ファイバにおける偏波モード分散を測定する場合に、透過型装置は遠く隔てられた2点に光源、光検出器を配置する必要があるため非実用的である。

【0081】反射型装置を実現困難にしている問題点は、反射型装置において測定される偏波モード分散値 τ_R の1/2が、目的とする被測定光ファイバの透過光に対する偏波モード分散値 τ_P とは必ずしも一致しない点である。一般に $\tau_R/2 \neq \tau_P$ という関係式はジョーンズ行列法に基づいて示される。今、反射型装置で得られる被測定光ファイバの偏光特性を表すジョーンズ行列をTとすると、Tは透過型装置で得られるジョーンズ行列Uを用いて $T = U^t U$ と表される。 $\text{Re}(z)$ 、 $\text{Im}(z)$ は複素数 z の実数部、虚数部をそれぞれ表す。

【0082】

【数33】

$$T = \begin{pmatrix} P & Q \\ -Q^* & P^* \end{pmatrix} = U^t U = \begin{pmatrix} u & -v^* \\ v & u^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u & v \\ -v^* & u^* \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} u^2 + (v^*)^2 & 2i \text{Im}(uv) \\ 2i \text{Im}(uv) & (u^*)^2 + v^2 \end{pmatrix} \quad (33)$$

【0083】ジョーンズ行列法によれば、式(23)より $\tau_R = 2\sqrt{(|P^-|^2 + |Q^-|^2)}$ 、 $\tau_P = 2\sqrt{(|u^-|^2 + |v^-|^2)}$ である。 $z_1 = u^- v^-$ 、 $z_2 = \star$

★ $u v^-$ とにおいて

【0084】

【数34】

17

18

$$\begin{aligned}
 |P'|^2 &= 4 |uu' + v^*(v')|^2 \\
 &= 4 (|u'|^2 + |v'|^2 - |z_1|^2 - |z_2|^2 + 2\text{Re}(z_1 z_2)) \\
 |Q'|^2 &= 4 (\text{Im}(z_1) + \text{Im}(z_2))^2 \\
 \text{故に } |P'|^2 + |Q'|^2 &= 4 (|u'|^2 + |v'|^2 - \text{Re}^2(z_1) - \text{Re}^2(z_2) + 2\text{Re}(z_1)\text{Re}(z_2)) \\
 &= 4 (|u'|^2 + |v'|^2 - \text{Re}^2(u'v - uv')) \quad (34)
 \end{aligned}$$

【0085】したがって

10*【数35】

【0086】

*

$$\begin{aligned}
 \tau_R &= 2\sqrt{|P'|^2 + |Q'|^2} \\
 &= 2 \cdot 2\sqrt{|u'|^2 + |v'|^2 - \text{Re}^2(u'v - uv')} \leq 2\tau_P \quad (35)
 \end{aligned}$$

【0087】であり、 $\tau_R / 2 = \tau_P$ となるのは $\text{Re}(u'v) = \text{Re}(uv')$ の場合に限ることが示された。反射型装置で演算されるジョーンズ行列 T の1行2列要素 $2i\text{Im}(uv)$ からは uv の実数部の情報が欠落しているので、ジョーンズ行列法に基づく限り、式(35)の左辺値 τ_R から τ_P は演算不可能である。

【0088】解決すべき第2の課題は、被測定光ファイバの偏波モード分散分布測定を可能にすることである。従来の技術の冒頭でも述べたように、既に敷設された光ファイバを利用して高速通信を可能にするためには、敷設された光ファイバに沿った偏波モード分散分布を測定し、周辺部と比較して高い偏波モード分散値を有すると診断された箇所の光ファイバを、最近の製造技術の進歩により製造可能となった偏波モード分散値を低く抑えた光ファイバと交換するのが、コスト面で有利である。ところが、従来の偏波モード分散測定法では被測定光ファイバ全体の偏波モード分散値が得られるのみであり、被測定光ファイバに沿った偏波モード分散分布を測定することは不可能であった。

【0089】本発明の目的は、被測定光ファイバを複数の波長板の直列接続としてモデル化し、各波長板の偏光特性を表すパラメータ値を、光ファイバの伝搬損失や後方散乱特性分布の測定装置として実用化されている時間領域反射測定装置(OTDR: Optical Time Domain Reflectometer)を利用して測定、および演算することにより、以上述べてきた偏波モード分散測定法に関する2つの課題を解決した偏波モード分散分布測定方法及び装置を提供することである。

【0090】

【課題を解決するための手段】前述の課題を解決するために、本発明の偏波モード分散分布測定方法は、被測定光ファイバの入射端に異なる偏光状態を有する光パルスを各々入射し、該入射端と同一の端面側に設けたストークスアナライザを用いて、各々の入射光パルスに対応する※50

※前記被測定光ファイバからの後方散乱光の偏光状態をストークスパラメータの時系列データとして測定し、該測定された異なる入射偏光状態に対応するストークスパラメータの時系列データを用いて、前記被測定光ファイバの偏光特性を記述するジョーンズ行列の時系列を演算し、該演算されたジョーンズ行列の時系列を用いて、前記被測定光ファイバの偏光特性を表すパラメータの前記被測定光ファイバに沿った分布を演算する一連の手続きを、前記被測定光ファイバの入射端にキャリア周波数の互いに異なる2つの光パルスを入射して行い、各々のキャリア周波数を有する入射光パルスに対応して演算された前記被測定光ファイバの偏光特性の分布を表すパラメータを用いて差分演算を行うことにより、前記被測定光ファイバを透過する光に対応する偏波モード分散の前記被測定光ファイバに沿った分布を測定することとしている。

【0091】また、本発明の偏波モード分散分布測定方法は、キャリア周波数の互いに異なる光パルスの出射が可能であって、第1の光パルスを出射する光パルス発生器と、出射光の偏光状態を複数の偏光状態に制御可能であって、前記第1の光パルスを受けてその偏光状態が制御された第2の光パルスを出射する偏光制御器と、該第2の光パルスを第1のポートで受けて第2のポートを通して被測定光ファイバに導くとともに、該被測定光ファイバからの後方散乱光を前記第2のポートで受けて第3のポートから出射する光結合器と、前記第3のポートから出射された後方散乱光を受けて、所定時間間隔毎に当該所定時間に受けた後方散乱光の偏光状態を表すストークスパラメータを出力する偏光状態測定部と、該偏光状態測定部からの前記ストークスパラメータを受けて、その時系列データを記憶するとともに、前記第2の光パルスの複数の偏光状態にそれぞれ対応する複数の時系列データを用いて、ジョーンズ行列の時系列データを演算するジョーンズ行列演算部と、該ジョーンズ行列演算部か

らの前記ジョーンズ行列の時系列データを受けて、被測定光ファイバの偏光特性を表すパラメータの時系列データを演算し記憶するとともに、前記第1の光パルスの互いに異なるキャリア周波数にそれぞれ対応する2組の前記偏光特性を表すパラメータの時系列データを用いて、前記所定時間間隔の各所定時間に対応する2つの偏光特性を表すパラメータの周波数差分演算を行うことで、前記被測定光ファイバにおける偏波モード分散分布を演算する偏波モード分散分布演算部とを備えている。

【0092】〔作用〕被測定光ファイバの片方の端面に光源と光検出器を配置する反射型装置による偏波モード分散分布測定の実施手順を、以下の2段階で説明する。

〔第1段〕被測定光ファイバのモデル化

〔第2段〕光ファイバモデルに含まれるパラメータを測定値より演算

【0093】先ず第1段では、被測定光ファイバを一種の波長板の直列接続としてモデル化する。図3に、PMD分布測定のために仮想的に分割された光ファイバモデルを示す。(k)番目の光ファイバ区間は、偏光特性を表*

*すパラメータ τ_k 、 ϕ_k 、 θ_k で特徴付けられる一種の波長板としてモデル化されている。各パラメータの物理的意味を次に示す。

τ_k : 直交2偏波間の遅延時間差、すなわち偏波モード分散

ϕ_k : 直交2偏波間の初期位相差

θ_k : 直交2偏波軸(主軸)の、直前の区間(k-1)における主軸に対する回転角

【0094】区間(k)における偏光状態の入出力特性を表すジョーンズ行列 SE_k 、すなわち区間(k-1)と接続する側からの入射偏光状態を表すジョーンズベクトル、ベクトルuと、区間(k)を伝搬、通過した後、区間(k+1)と接続する側から出射される偏光状態を表すジョーンズベクトル、ベクトルvとを、関係式ベクトル $v = SE_k \cdot$ ベクトルuで結び付ける行列を、測定光の角周波数を ω として次式で表す。

【0095】

【数36】

$$SE_k = (\psi_k)(\theta_k) \quad (36)$$

$$(\psi_k) = \begin{pmatrix} \exp(-i\psi_k/2) & 0 \\ 0 & \exp(i\psi_k/2) \end{pmatrix}, \quad \psi_k = \omega\tau_k + \phi_k,$$

$$(\theta_k) = \begin{pmatrix} \cos \theta_k & -\sin \theta_k \\ \sin \theta_k & \cos \theta_k \end{pmatrix},$$

性質 $(\theta_k)^t = (-\theta_k)$ を第2段の説明で用いる。

【0096】 SE_k は直交2偏波間に位相シフト ψ_k を付与する波長板の主軸が、直前の区間(k-1)における主軸に対し θ_k 回転した場合のジョーンズ行列と見なせる。被測定光ファイバ入力端から区間(k)までを表*

$$S_k = SE_k SE_{k-1} \cdots SE_2 SE_1 = SE_k S_{k-1} \quad (37)$$

【0098】で表される。区間(k)において後方散乱され、区間(1)までを逆方向に伝搬して光検出器で検出される光に対応するジョーンズ行列 R_k は、 S_k を用★

★いて次式で表される。

【0099】

【数38】

$$R_k = S_k^t S_k = S_{k-1}^t (SE_k^t SE_k) S_{k-1} \quad (38)$$

【0100】以上説明した光ファイバモデルに基づけば、従来の偏波モード分散測定法における解決すべき課題「反射型装置により被測定光ファイバの透過光に対する偏波モード分散分布を測定する手段を提供すること」は、各光ファイバ区間の偏光特性を表すパラメータ値、特に偏波モード分散を意味する τ_k を逐一求める手段を与えることで解決される。なぜなら、 τ_k を始め光ファイバモデルに含まれるパラメータは、光ファイバの透過光に対する物理量として定義されており、かつ、光ファイバ区間毎に異なる値を取り得るからである。

☆【0101】第2段では、第1段で導入した光ファイバモデルに含まれるパラメータを、光ファイバの伝搬損失や後方散乱特性分布の測定装置として実用化されているOTDRを利用して測定されたストークスベクトルの時系列データを用いて演算する。パラメータの演算は、所定の時刻に測定されたストークスベクトルから演算されるジョーンズ行列の固有値解析に帰着される。

【0102】被測定光ファイバの片方の端面に、所望のキャリア周波数、およびパルス幅を有する光パルスを生可能な光源と、ストークスベクトルを測定するための

☆50

21

ストークスアナライザを配置する。被測定光ファイバの端面より、所望のキャリア周波数、およびパルス幅を有する光パルスを入射させると、パルス入射時点を基点とする時刻(経過時間) t においてストークスアナライザで測定されるストークスベクトルは、 v を光ファイバ中の光速として、被測定光ファイバ内部において入射端からの距離 $vt/2$ の位置で後方散乱された光の偏光状態を与える。

【0103】〔区間(1)のパラメータ ψ_1 , θ_1 の演算】

$$R_1 = SE_1^t SE_1 = (-\theta_1)(2\psi_1)(\theta_1) \quad (39)$$

【0105】と表される。最左辺の R_1 は既知(測定値より演算済)だから、最右辺の $(2\psi_1)$ は対角行列、かつ $(-\theta_1) = (\theta_1)^{-1}$ であることに着目すると、 R_1 の固有値、固有ベクトルを演算することで、 ψ_1 は固有値の偏角として、 θ_1 は固有ベクトルの向きとして得られる。なぜなら、一般に2行2列の行列 X の固有値、固有ベクトルの組を $(\lambda_1, \text{ベクトル } x_1)$ 、 $(\lambda_2, \text{ベクトル } x_2)$ とし、固有(列)ベクトル、ベクトル x_1 , x_2 を並べた行列を $P = (\text{ベクトル } x_1, \text{ベクトル } x_2)$ と書くと、行列 X は P と、固有値を対角要素に並べた行列の積として次式で表されるからである。

$$XP = P \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} \text{より } X = P \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix} P^{-1} \quad (40)$$

【0107】そこで、与えられた行列 X を $X = (-\theta)(2\psi)(\theta)$ の形に表す θ , ψ の表式を求める。先ず、左辺 X は行列式1のユニタリー行列、右辺は対称行列であることに着目すると、 X の行列要素は u, v, w ★

$$X = \begin{pmatrix} u+iv & iw \\ iw & u-iv \end{pmatrix}, \quad u^2 + v^2 + w^2 = 1 \quad (41)$$

【0109】 X の固有値は $\det(tI - X) = t^2 - 30\psi$ と等置して ψ を得る。

$2ut + 1 = 0$ の解 $u \pm \sqrt{u^2 - 1} = u \pm i\sqrt{v^2 + w^2}$ 【0110】

で与えられるので、これを $\exp(\pm 2i\psi)$ ★ 【数42】

$$\psi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{v^2 + w^2}}{u} \right) \quad (42)$$

【0111】次に、固有値 $\exp(\pm 2i\psi)$ に関する ◆ $n\theta$ と置いて

固有値方程式 $X \cdot \text{ベクトル } x$ 右下添字 $\pm = \exp(\pm 2i\psi) \cdot \text{ベクトル } x$ 右下添字 \pm を書き下すと、 $t = ta$ ◆ 【0112】

【数43】

$$u + iv + iw \cdot t = \exp(-2i\psi),$$

$$u + iv - iw \cdot t^{-1} = \exp(2i\psi) \text{ より}$$

$$\begin{aligned} t^{-1} - t &= \frac{2}{\tan 2\theta} \\ &= \frac{2(u + iv) - \exp(2i\psi) - \exp(-2i\psi)}{iw} = \frac{2v}{w} \end{aligned}$$

$$\text{したがって } \theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{w}{v} \right) \quad (43)$$

【0113】以上より、 $X = (-\theta)(2\psi)(\theta)$ を ★50★ 満たす ψ , θ は X の行列要素を用いて式(42)、(43)で表

22

★算〕区間(1)の光ファイバ長を l_1 として、時刻 $t_1 = 2l_1/v$ において測定されるストークスベクトルよりジョーンズ行列 R_1 を演算する。ジョーンズ行列法の説明で述べたように、3種類の偏光状態を有するパルス光を入射した場合の出射ストークスベクトルを測定し、その測定結果よりジョーンズ行列を演算する。 R_1 は式(36)、(38)より

【0104】

【数39】

※ 2 , ベクトル x_2)とし、固有(列)ベクトル、ベクトル x_1 , x_2 を並べた行列を $P = (\text{ベクトル } x_1, \text{ベクトル } x_2)$ と書くと、行列 X は P と、固有値を対角要素に並べた行列の積として次式で表されるからである。

【0106】

【数40】

★を実数として次式で表される。

【0108】

【数41】

された。

【0114】〔区間(2)のパラメータ ψ_2 , θ_2 の演算〕区間(1)+区間(2)の光ファイバ長を l_2 として、時刻 $t_2 = 2l_2/v$ において測定されるストークスベ*

$$R_2 = S_2^t S_2 = SE_1^t (SE_2^t SE_2) SE_1 \quad (44)$$

【0116】である。 SE_1 は既知だから式(36)と合せて

$$(SE_1^t)^{-1} R_2 SE_1^{-1} = SE_2^t SE_2 = (-\theta_2) (2\psi_2) (\theta_2) \quad (45)$$

【0118】を得る。最左辺 $(SE_1^t)^{-1} R_2 (SE_1^{-1})^{-1}$ は既知だから、区間(1)と同様の演算、すなわち最左辺の行列の固有値解析により区間(2)のパラメータ ψ_2 , θ_2 を得る。

【0119】〔区間(k-1)までのパラメータを既知として、区間(k)のパラメータ ψ_k , θ_k の演算〕区間(1)から(k)までの各区間の光ファイバ長の総和を l_k ★

$$(S_{k-1}^t)^{-1} R_k (S_{k-1})^{-1} = SE_k^t SE_k = (-\theta_k) (2\psi_k) (\theta_k) \quad (46)$$

【0121】が成り立つ。最左辺は既知であるので、区間(1)と同様の演算により ψ_k , θ_k を得る。

【0122】以下同様にして、OTDRを用いて被測定光ファイバからの後方散乱光に対し測定されるストークスベクトルの時系列データを用い、ストークスベクトルより演算されるジョーンズ行列の固有値解析を行うことで、被測定光ファイバの偏光特性を表すパラメータの分布 $\psi_k(\omega)$, θ_k , $k=1, 2, \dots$ が得られた。ここでパラメータ ψ_k は、OTDRで利用する光パルスのキャリア角周波数 ω に依存することを明示した。一連の測定、演算を、キャリア角周波数 $\omega + \Delta\omega$ を有する光パルスを用いて実行することで $\psi_k(\omega + \Delta\omega)$ を求め、 $\psi_k = \omega\tau_k + \phi_k$ と定義されていたから、差分演算 $\tau_k = (\psi_k(\omega + \Delta\omega) - \psi_k(\omega)) / \Delta\omega$ により区間(k)における偏波モード分散 τ_k を得る。

【0123】以上説明した測定、演算により、一種の波長板の直列接続としてモデル化した被測定光ファイバの偏光特性を表すパラメータの分布、特に偏波モード分散の分布 τ_k を求めることが可能となった。なお、以上説明した演算により求められたジョーンズ行列 S_k , $k=1, 2, \dots$ の積を演算することで被測定光ファイバ全体のジョーンズ行列を求め、従来の技術の欄で説明したジョーンズ行列法に従って、式(23)を用いて被測定光ファイバ全体の偏波モード分散を求めることが可能である。あるいは、被測定光ファイバの全長を l として、時刻 $2l/v$ に測定されるストークスベクトルより、被測定光ファイバ全体を往復した光に対するジョーンズ行列 R を演算し、 R の行列要素を区間(1)のパラメータ ψ_1 , θ_1 の演算で説明した式(42)に代入して、被測定光ファイバにおいて定義される主偏光状態間の位相差 $\psi(\omega)$ を演算して、キャリア角周波数 $\omega + \Delta\omega$ ☆

*クトルよりジョーンズ行列 R_2 を演算する。式(38)より

【0115】

【数44】

※【0117】

※【数45】

★として、時刻 $t_k = 2l_k/v$ におけるストークスベクトルより演算されるジョーンズ行列 R_k と、区間(k-1)までのジョーンズ行列 $S_{k-1} = SE_{k-1} \dots SE_1$ を用いて

【0120】

【数46】

20 ☆ ω の光パルスを用いて同様に測定、演算された位相差 $\psi(\omega + \Delta\omega)$ との周波数差分 $(\psi(\omega + \Delta\omega) - \psi(\omega)) / \Delta\omega$ より、被測定光ファイバ全体の偏波モード分散を求めることも可能である。

【0124】

【発明の実施の形態】図1は本発明の偏波モード分散分布測定方法の実施の形態を示すフローチャート、図2は本発明の偏波モード分散分布測定装置の実施の形態を示す構成図である。図1及び図2に基づき発明の実施の形態を説明する。周波数可変光源1より発生された所望の角周波数 ω を有する連続光を光強度変調器12の光入力部へ入力し、駆動回路13より発生された所望のパルス幅を有するパルス信号により前記光強度変調器12を駆動して、該光強度変調器12の光出力部より、所望のキャリア角周波数 ω とパルス幅 Δt を有する光パルスP1を発生させる。該光パルスP1を偏光制御器2の光入力部へ入力し、該偏光制御器2の光出力部より水平直線偏光状態を有する光パルスP2を出力させる。前記偏光制御器2より出力された光パルスP2は光結合器3を介して被測定光ファイバ4の端面4aへ入力される。被測定光ファイバ4の内部において後方散乱され、前記端面4aより出力された光は、前記光結合器3を介して偏光状態測定部5へ入力される。該偏光状態測定部5は入力光の偏光状態を表すストークスパラメータを出力する。該出力されたストークスパラメータは、前記光パルス幅 Δt の2倍の時間間隔毎の時系列データとしてジョーンズ行列演算部6に格納される。時系列データの格納は、光パルス発生器1からの同期信号を基にした、前記光パルスP2が被測定光ファイバ4へ入力された時刻を基点とし、被測定光ファイバ4の長さから決定される所定の経過時間まで行われる。

【0125】次に、水平直線偏光状態の光パルスを用いて実施した上記測定（図1のStep1）を、前記偏光制御器2を制御して、垂直直線偏光状態の光パルス、45度直線偏光状態の光パルスをそれぞれ発生させて行う（それぞれ図1のStep2, Step3）。

【0126】以上、3種類の偏光状態の光パルスを用いた測定が終了した時点で、ジョーンズ行列演算部6において、該ジョーンズ行列演算部6に格納されているストークスパラメータの時系列データを用いて、従来の技術で述べた手続きにしたがって、式(12)、(13)、(14)よりジョーンズ行列を表すパラメータ Θ 、 ϕ 、 ψ を求めてジョーンズ行列の時系列 R_k 、 $k=1, 2, \dots$ を演算する（図1のStep4）。次に、該ジョーンズ行列演算部6で演算されたジョーンズ行列の時系列を用いて偏波モード分散分布演算部7により、課題を解決するための手段の欄で説明した演算手続きにしたがって、被測定光ファイバの偏光特性を表すパラメータ $\psi_k(\omega)$ 、 θ_k 、 $k=1, 2, \dots$ を式(42)、(43)により演算して、演算結果を該偏波モード分散分布演算部7に格納する（図1のStep4）。

【0127】以上説明した一連の測定、および演算の手続きを、前記周波数可変光源11から発生される連続光の角周波数を $\Delta\omega$ 変化させて（図1のStep5, Step6）実行し、得られた偏光特性パラメータ $\psi_k(\omega+\Delta\omega)$ と、前記偏波モード分散分布演算部7に格納しておいた $\psi_k(\omega)$ を用いて、該偏波モード分散分布演算部7において周波数差分演算（ $\psi_k(\omega+\Delta\omega)-\psi_k(\omega)/\Delta\omega$ ）を行い、被測定光ファイバ4における偏波モード分散分布を表す τ_k 、 $k=1, 2, \dots$ を求める（図1のStep7）。

【0128】光パルスP1の発生（光パルス発生器1）は、発明の実施の形態で説明した周波数可変光源11と光強度変調器12の組合せの他にも、周波数可変光源をパルス信号により駆動し、所望のキャリア周波数、およびパルス幅を有する光パルスを発生させる手段を用いてもよい。光強度変調器12としては、(1)電気光学効果を有する結晶上に光導波路、および変調信号印加電極を形成し作製された光強度変調器、(2)音響波により光をブラッグ(Bragg)回折させる音響光学変調器、等が用いられる。偏光制御器2としては、(1)方位角可変の単一偏光子、(2)主軸方位角可変の波長板、等が用いられる。光結合器3としては、ビームスプリッタ、Y分岐型光導波路、光サーキュレータ、等の光分岐素子が用いられる。偏光状態測定部5は、複数の光分岐素子、検光子、1/4波長板より構成されるストークスアナライザが用いられる。

【0129】説明した発明の実施の形態では、被測定光ファイバへの入力偏光状態として、水平直線、垂直直線、および45度直線偏光状態の3種類を用いているが、互いに異なる任意の3種類の偏光状態を用いた測定

を実施してもよい。また、ストークスパラメータの時系列データの格納や、ジョーンズ行列の時系列データの演算は、光パルス幅 Δt の2倍の時間間隔で実施しているが、 Δt の2倍以上の任意の時間間隔で実施してもよい。

【0130】なお、図1においてStep4で行っているジョーンズ行列の時系列 R_k 、該時系列 R_k を用いてのパラメータ ψ_k 、 θ_k の演算は、キャリア角周波数 ω 及び $\omega+\Delta\omega$ についてのそれぞれの第1〜3のストークスパラメータの時系列データを測定した後に行ってもよい。

【0131】

【発明の効果】本発明は、被測定光ファイバの片方の端面に光パルスを発生可能な光源と、偏光状態測定装置を配置した反射型装置構成をとり、光パルスを入力された被測定光ファイバからの後方散乱光の偏光状態を表すストークスパラメータの時系列データ、およびストークスパラメータより演算されるジョーンズ行列の時系列データを得て、一種の波長板の直列接続としてモデル化した被測定光ファイバの偏光特性を表すパラメータ、特に偏波モード分散の分布を、該ジョーンズ行列の時系列データに対する固有値解析を逐次繰返す演算手段により演算することとしたので、敷設された光ファイバを測定対象とした場合に、被測定光ファイバを透過した光に対する偏波モード分散測定装置としての実用性を高め、かつ、被測定光ファイバに沿った偏波モード分散分布を測定可能とした。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の偏波モード分散分布測定方法の実施の形態を示すフローチャートである。

【図2】本発明の偏波モード分散分布測定装置の実施の形態を示す構成図である。

【図3】本発明の偏波モード分散分布測定方法を説明するための図である。

【図4】従来の3種類の偏波モード分散測定方法に対応する測定装置の構成図である。

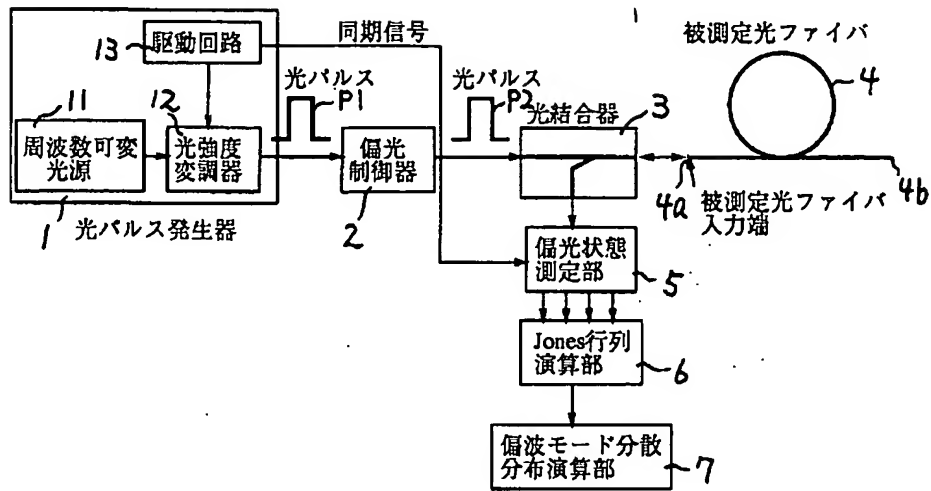
【符号の説明】

- 1 光パルス発生器
- 2 偏光制御器
- 3 光結合器
- 4 被測定光ファイバ
- 4a 被測定光ファイバの一端（入力端、入射側端面）
- 4b 被測定光ファイバの他の端面
- 5 偏光状態測定部
- 6 ジョーンズ行列演算部
- 7 偏波モード分散分布演算部
- 8 偏光解析器
- 9 ジョーンズ行列演算部
- 10a 偏波モード分散演算部
- 10b 偏波モード分散演算部

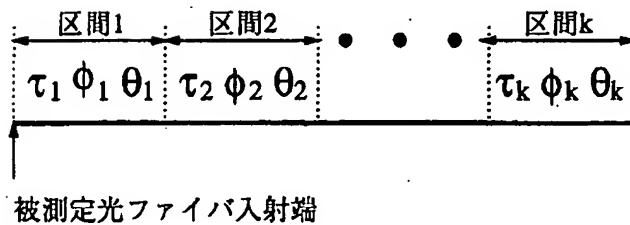
27
 10c 偏波モード分散演算部
 11 周波数可変光源
 12 光強度変調器
 13 駆動回路

28
 81 検光子（方位角固定の偏光子）
 82 光検出器
 83 ストークスアナライザ
 84 光検出器

【図2】



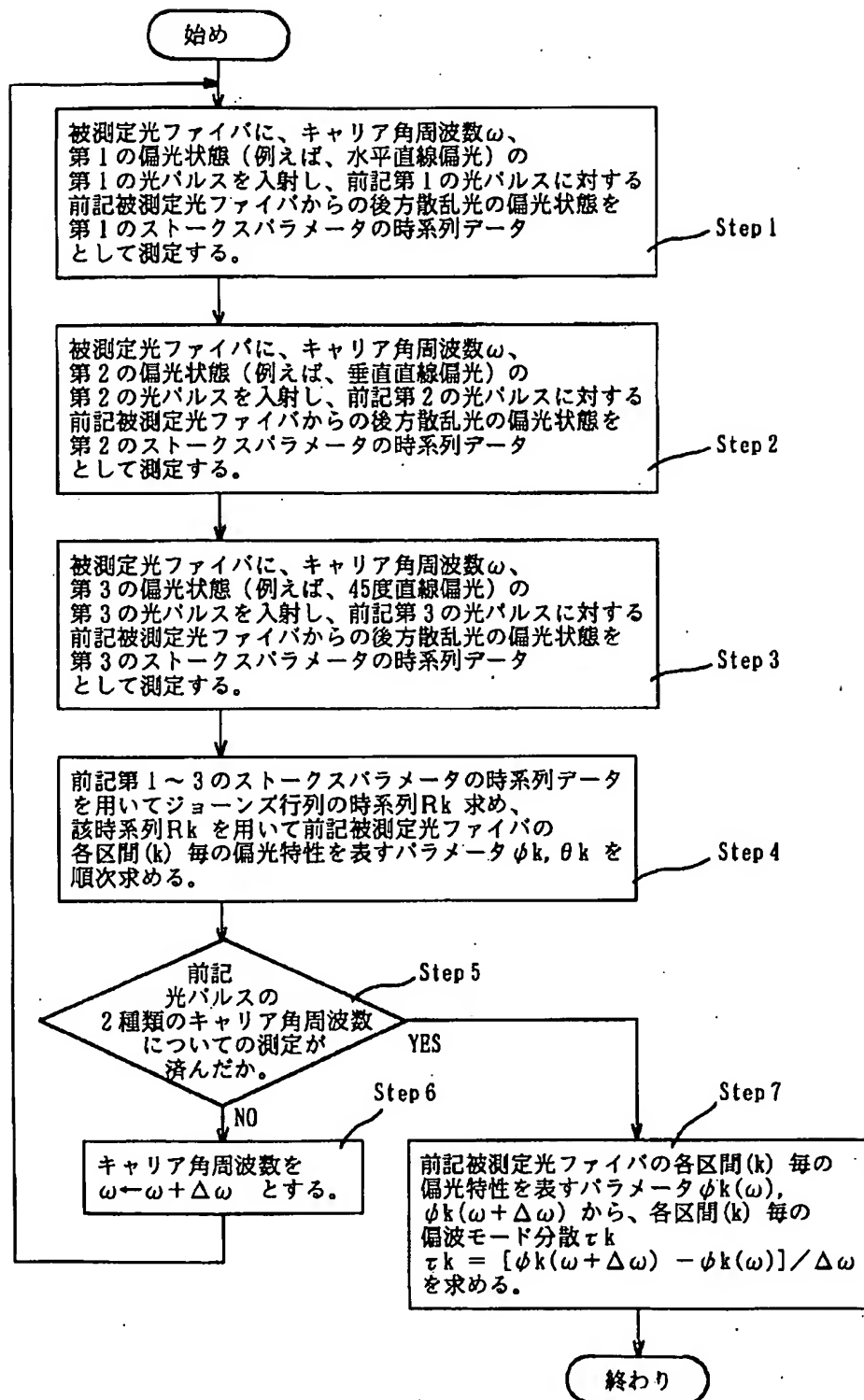
【図3】



〔偏光特性を表すパラメータ τ_k , ϕ_k , θ_k の物理的意味〕

- τ_k : 直交2偏波間の遅延時間差, すなわち偏波モード分散.
 ϕ_k : 直交2偏波間の初期位相差.
 θ_k : 直交2偏波軸(主軸)の、直前の区間($k-1$)における主軸に対する回転角.

【図 1】



【図4】

